

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ КЕРНА

*Галина Витальевна Решетова*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-79-93, e-mail: kgv@nmsf.sccc.ru

*Анчугов Алексей Владимирович*

АО Геологика, 630055, Россия, г. Новосибирск, ул. Мусы Джалиля 23, бакалавр геологии (специализация геофизика), ведущий инженер-разработчик, тел. (913)913-46-98, e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

В работе представлены результаты натуральных экспериментов и численного моделирования для решения задачи восстановления событий акустической эмиссии. В качестве математической модели использовались уравнения динамической теории упругости в полярной системе координат. По результатам моделирования удалось оценить ряд основных характеристик для конфигурации многоканальной системы сбора данных, частотной состав целевых сигналов АЭ, определить необходимое количество каналов регистрации и положение датчиков относительно образца керна. В ближайшее время планируется переход к трехмерному моделированию с целью разработки математического метода восстановления событий АЭ по записям реального физического эксперимента.

**Ключевые слова:** керн, геомеханические испытания керна, акустическая эмиссия, численное моделирование

## SIMULATION OF ACOUSTIC EMISSIONS FOR REAL CORE SAMPLES

*Galina V. Reshetova*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-79-93, e-mail: kgv@nmsf.sccc.ru

*Alexey V. Anchugov*

JSC Geologika, 23, M. Djalilya St., Novosibirsk, 630055, Russia, BSc, Engineer RND, phone: (913)913-46-98, e-mail: alexey.anchugov@gmail.com

The paper presents the results of laboratory experiments and numerical modeling for solving the problem of acoustic emission event recovery. The equations of the dynamic theory of elasticity in the polar coordinate system were used as a mathematical model. The simulation results made it possible to evaluate a number of basic characteristics for the configuration of a multichannel data acquisition system, the frequency of the AE signals, to determine the required number of recording channels and the position of the sensors in the core., The 3D modeling is planned in the near future in order to develop a mathematical method for reconstructing the AE events from the records of a real physical experiment.

**Key words:** core, geomechanical tests of core, acoustic emission, numerical simulation.

## *Введение*

Одним из способов исследования свойств кернового материала в лабораторных условиях, является проведение физического эксперимента, при котором образец горной породы подвергается различным механическим воздействиям. В результате такого воздействия, в образце возникает напряженно-деформированное состояние, сопровождаемое деформацией и частичным (или полным) разрушением. Одним из индикаторов изменяющегося во времени поля упругих напряжений в образце являются сигналы акустико-эмиссионной энергии или акустической эмиссии (АЭ) [1-4]. Это сигналы акустических волн, регистрируемые с электрических пьезоакустических преобразователей, прикрепленных к поверхности керна. В своих исследованиях мы планируем использовать наблюдение сигналов АЭ применительно к лабораторному оборудованию, моделирующему процессы в нефтегазовом пласте. В настоящее время в мире существует всего несколько типов установок для проведения лабораторных исследований образцов керна с регистрацией сигналов АЭ. Среди зарубежного оборудования можно выделить MTS, TerraTek, а среди специализированного программного обеспечения InSite AE/Microseismic software английской компании Itasca Consulting Ltd. В тоже время на российском рынке пока нет доступного отечественного оборудования для проведения комплексных геомеханических исследований совместно с регистрацией сигналов АЭ. Данная работа ставит своей целью найти подходы к построению подобной измерительной системы. В качестве основы будет использоваться отечественная установка УИДК (установка для исследования прочностных свойств керна в пластовых условиях производства АО Геологика), представленная на рис. 1.



Рис. 1. Установка УИДК для исследования прочностных свойств керна в пластовых условиях производства АО Геологика

С помощью имеющегося оборудования, есть возможность записывать сигналы АЭ и использовать эту ценную информацию. Чтобы реализовать такую запись, нужны дополнительные исследования, базирующиеся, с одной стороны, на сборе и обработке реальных данных, с другой стороны, на методах математического моделирования процесса АЭ.

### **Сбор данных**

Для сбора данных была проведена серия лабораторных экспериментов по одноосному нагружению со скоростью 1 МПа/сек (до разрушения на 40-200 МПа) образцов кернa размером 60x30 мм. В ходе каждого эксперимента в двух каналах непрерывно регистрировались сигналы АЭ. Одна из целей экспериментов состояла в изучении характерных сигналов АЭ и их амплитудных спектров. Диапазон спектров является крайне важным параметром для разработки системы наблюдений и обработки данных. На рис. 2 приведены типичный фильтрованный (применен Фильтр Высоких Частот (ФВЧ) с нижней частотой 50 КГц для удобства наглядного восприятия) сигнал АЭ (а) и его спектр (б). На графике видно, что верхняя частота сигнала при регистрации системой УИДК простирается значительно выше предполагаемого нами изначально значения в 100 КГц.

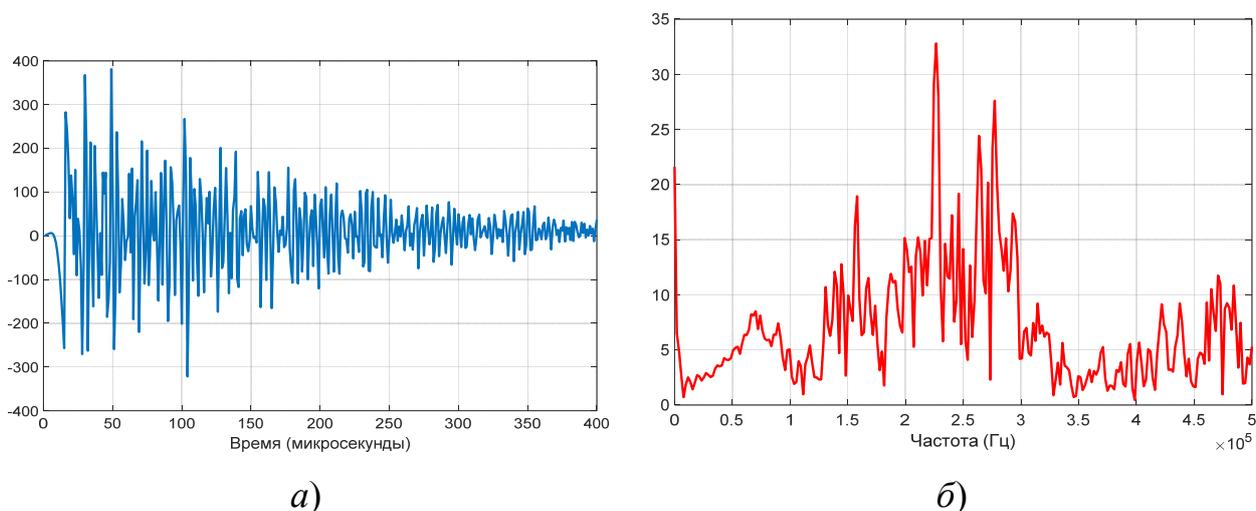


Рис. 2. Фильтрованный сигнал АЭ ФВЧ 50 КГц (а) и его спектр (б)

### **Моделирование АЭ**

Цель моделирования, которую мы перед собой ставим, состоит в создании программного продукта, нацеленного на восстановление событий АЭ по записям реального физического эксперимента.

Для того, чтобы провести корректно численное моделирование, в первую очередь нужно выбрать параметры модели (размер кернa, его состав, частотный

состав акустических сигналов и др.) максимально приближенные к эксперименту. Единственное, что для нас представляло неопределенность, это частотный состав событий АЭ. Как раз для этого и проводились лабораторные эксперименты, по записям которых был определен характерный диапазон амплитудных спектров сигналов АЭ. Этот интервал в дальнейшем использовался нами при проведении численного моделирования, а именно, частота функции в источнике задавалась из этого диапазона частот.

Изучение образцов цилиндрической формы и максимально точный учет их границ при численном моделировании приводит к необходимости проведения исследований в цилиндрической (3D), или полярной (2D) системах координат. В своих алгоритмах мы используем цилиндрическую/полярную сетку с периодическим измельчением азимутального шага [5] и интерполяцию на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6] для склеивания сеток с разным азимутальным шагом.

Для экспресс оценки всех параметров трехмерной математической модели, мы начали рассмотрение с двумерного случая. В качестве определяющих уравнений использовались уравнения динамической теории упругости в полярной системе координат. Для моделирования демпфирующей манжеты, обжимающей керн, использовались поглощающие граничные слои в виде PML [7]. Проведение виртуального физического эксперимента проводится в два этапа.

Первый этап состоит в моделировании имитации сжатия образца, при котором внутри области, вследствие внутренних напряжений и деформаций, возникают локальные источники сейсмических волн в разные моменты времени. Возникающее суммарное волновое поле регистрируется на виртуальных датчиках, расположенных с внешней стороны моделируемого образца.

На втором этапе необходимо восстановить положения источников. Доступной информацией являются только данные регистрации в датчиках, полученные на этапе 1. Для решения обратной задачи мы применяем методом Зеркального Обращения Времени. В русскоязычных публикациях еще нет устоявшегося названия этого подхода, в англоязычной литературе он называется Time Reversal Mirror (TRM) [8-10]. Метод работает следующим образом. Записанные в приемниках трассы переворачиваются по времени и в виде импульса передаются обратно в среду, при этом положение источников, посылающих перевернутый импульс совпадает с положением приемников, их записавших. Обращенные во времени сигналы распространяются в обратном направлении через среду и фокусируются в точке источника. Этот подход позволяет локализовать в пространстве и времени источники возбуждения акустических волн.

### ***Численные эксперименты***

Для численных экспериментов был выбран образец диаметром 30 миллиметров. Этот размер образца керна является типичным при проведении лабораторных исследований.

Упругие свойства образца задавались скоростями продольной и поперечной волн  $v_p = 3500$  м/с,  $v_s = v_p / \sqrt{3}$  м/с и плотностью  $\rho = 3500$  кг/м<sup>3</sup>. Предполагается, что внутри образца возникают локальные источники сейсмических волн. В численном эксперименте источники акустических волн располагаются в трех точках ( $r_1 = 0.01, \varphi_1 = 0$ ), ( $r_2 = 0.01, \varphi_2 = 0$ ) и ( $r_3 = 0.01, \varphi_3 = 0$ ). В качестве функции в источнике используется Гауссиан  $f(t) = \exp(-(\pi f_0(t - t_0))^2)$  с частотой  $f_0 = 4$  МГц и задержкой импульса  $t_{01} = 5/f_0$  для первого источника,  $t_{02} = 8/f_0$  для второго и  $t_{03} = 15/f_0$  для третьего источника. Время расчета задачи  $T = 0.01$  мс. Приемники, в количестве 24 штук, равномерно располагаются на внешней стороне круга.

**Первый этап.** Для численного моделирования волнового поля, возбуждаемого источниками в образце керна, используется явный конечно-разностный метод. Рассчитанное суммарное волновое поле регистрируется в приемниках, равномерно расположенных на внешней поверхности керна. На рис. 3 представлены снимки волнового поля для компоненты  $u_r$  в различные моменты времени. Время записи изображений возрастает справа налево и сверху вниз. На левом верхнем изображении рис. 3 видно формирование волнового поля от первого и второго источников, в то время, как третий источник еще не сработал. На следующем по времени изображении возникает волна и от третьего источника.

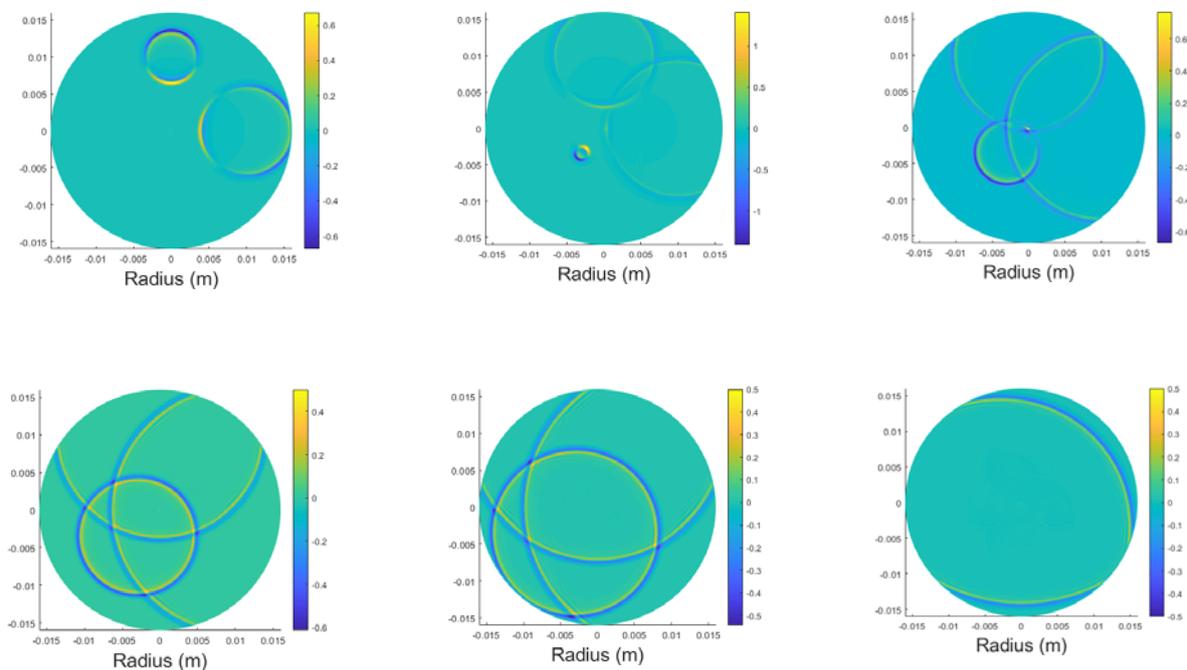


Рис. 3. Снимки волнового поля для компоненты  $u_r$  в различные моменты времени (справа налево, сверху вниз)

**Второй этап.** Задачей второго этапа моделирования является восстановление положений источников и времени их возникновения. В качестве доступной информации можно использовать только записанную сейсмограмму и информацию о свойствах среды. Для решения сформулированной задачи сначала переворачиваем трассы по времени и используем их в качестве сигнала, посылаемого в эту же среду в обратном времени. Положение каждого источника, посылающего сигнал, совпадает с положением приемника, его записавшего. На рис. 4 представлены снимки волнового поля для компоненты  $u_r$  в различные моменты времени (в обратном времени, от  $T$  до нуля). В нижней колонке рисунка времена выбраны так, чтобы соответствовать моментам возникновения первого, второго и третьего источников. Как видно, наблюдается разрастание амплитуды в эти моменты времени в тех местах, где, как мы знаем, должны располагаться источники. Однако четко выделить эти события достаточно сложно из-за наличия множества локальных максимумов. Нами предлагается другой способ выделения положений источников, основанный на рассмотрении суммарной энергии волнового процесса. Суть его заключается в том, чтобы в каждой точке  $(r, \varphi)$  полярной сетки рассчитывать суммарную энергию деформаций со всех предыдущих временных шагов конечно-разностного метода. На рис. 5 приведены снимки волнового поля суммарной энергии в различные моменты времени. Видно, что этот подход позволяет достаточно уверенно восстановить, как время возникновения источников, так и их положение внутри образца керна (красные пятна внутри области).

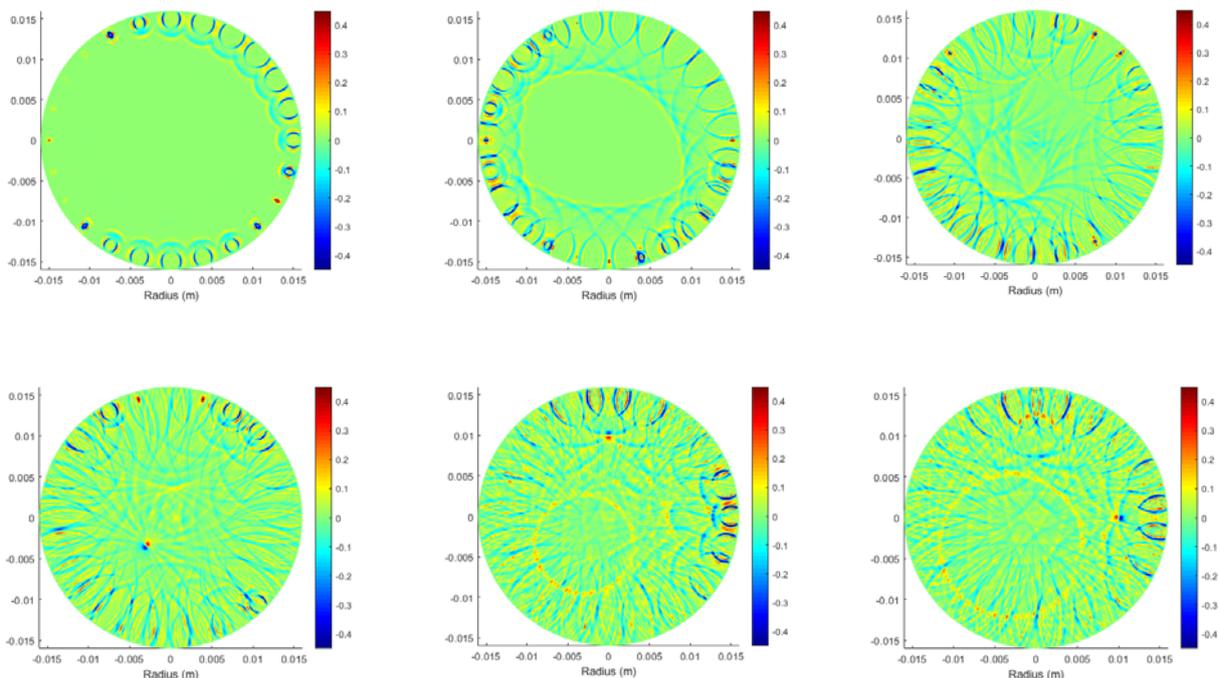


Рис. 4. Продолжение волнового поля в обратном времени (справа налево, сверху вниз). Снимки волнового поля для компоненты  $u_r$ .

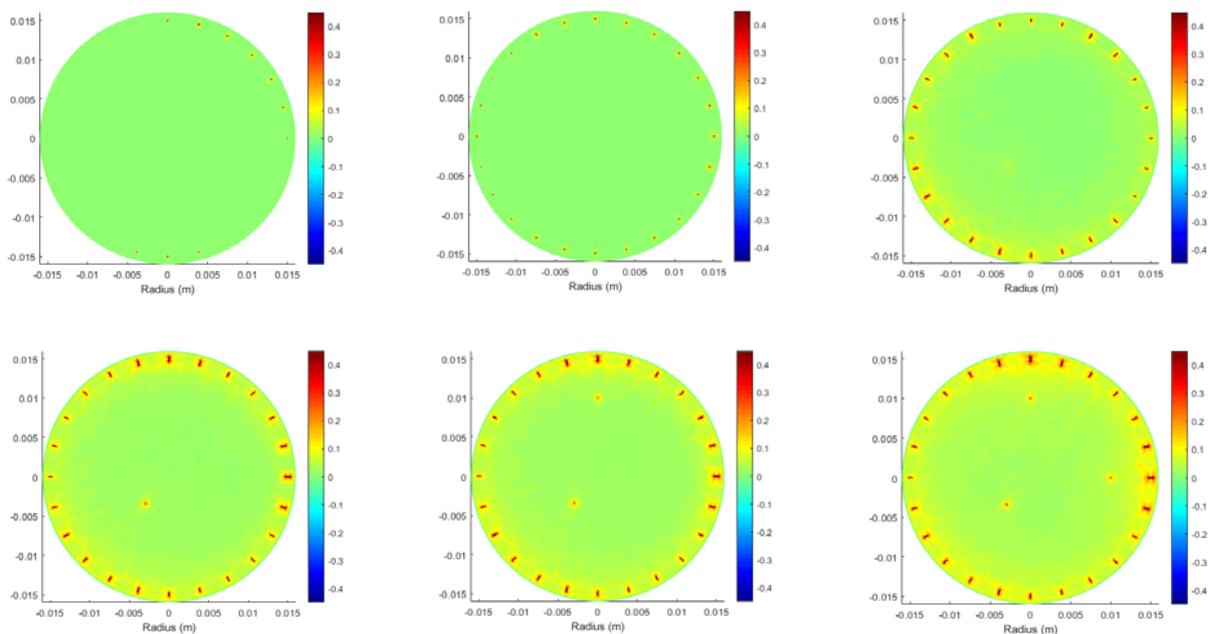


Рис. 5. Снимки волнового поля суммарной энергии в различные моменты времени (справа налево, сверху вниз).

### *Заключение*

В работе представлены результаты лабораторных экспериментов и математического моделирования для решения задачи восстановления событий акустической эмиссии по записям реального физического эксперимента. Для экспресс-оценки всех параметров полномасштабной трехмерной математической модели, которую предполагается использовать в дальнейшем, были проведены пробные расчеты для двумерного случая. Математическая модель описывалась системой уравнений динамической теории упругости, записанной в полярной системе координат. Уже в двумерном случае удалось получить ряд ценной информации. В частности, удалось оценить возможный размер образца керна, возможную конфигурацию многоканальной системы сбора данных, частотный состав целевых сигналов АЭ, определить необходимое количество каналов регистрации и положение датчиков относительно образца керна. В наших следующих лабораторных и численных экспериментах мы будем ориентироваться уже на трехмерные модели, моделирующие использование пьезокерамики с резонансной частотой 1 МГц и измерительную систему с частотой дискретизации 10 МГц.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00347 А, с использованием оборудования Центров коллективного пользования высокопроизводительными вычислительными ресурсами Сибирского суперкомпьютерного центра ИВМиМГ СО РАН [11], Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН [12] и Иркутского суперкомпьютерного центра СО РАН [13].*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kaiser J. Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch // Dr.-Ing. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität München (TUM); 15.2.1950.
2. Обзор применения акустической эмиссии для выявления микро- и нанодфектов / Шайко-Шайковский А.Г., Богорош А.Т., Воронов С.А., Марченко К.В. // Надежность и качество сложных систем. - 2016. - № 1 (13). - С. 47-57.
3. Кретов Е. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. М.: СБЕН, 2014. - 312 с.
4. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017. – 362 с.
5. Pissarenko, D.; Reshetova, G.V.; Tcheverda, V.A. 3D finite-difference synthetic acoustic logging in cylindrical coordinates // Geophysical Prospecting. – 2009. – 57(3). – P. 367-377.
6. Бахвалов Н. С. Численные методы. М.: Наука, 1973. - 632 с.
7. Вишнеvский Д. М., Костин В. И., Чеверда В. А. Возбуждение сейсмических волн источником, расположенным в скважине, заполненной жидкостью // Физическая мезомеханика. – 2003. Т. 5(5). – С. 85-92.
8. Fink, M. Acoustic Time-Reversal Mirrors // Topics Appl. Phys. – 2002. – 84. –P. 17-43.
9. José M. F. M., Yuanwei J. Detection by Time Reversal: Single Antenna // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2007. – 55(1). – P. 187-201.
10. Real time bolt preload monitoring using piezoceramic transducers and time reversal technique - a numerical study with experimental verification / Parvasi, S. M., Ho, Siu Chun M., Kong, Q., Mousavi, R., Song, G. // Smart Materials and Structures. -2016. - 25(8).
11. Сибирский суперкомпьютерный центр ИВМиМГ СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. – Новосибирск: ССКЦ СО РАН. – URL: <http://www.sscs.icmmg.nsc.ru/>.
12. Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН [Электронный ресурс]: сайт. – Москва: МСЦ РАН. – URL: <http://old.jssc.ru/>.
13. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: сайт. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН. – URL:<http://hpc.icc.ru>.

© Г. В. Решетова, А. В. Анчугов, 2019